

THREE-PHASE INVERTER FOR HIGH-SPEED INDUCTION MOTOR

Michal Pindák

Master Degree Programme (5), FEEC BUT

E-mail: xpinda02@stud.feec.vutbr.cz

Supervised by: Petr Procházka

E-mail: prochazkap@feec.vutbr.cz

Abstract: The aim of this project is to design a three-phase inverter for high speed induction motor. Nowadays, inverters are one of the most used devices for the torque and the rotational speed regulation of synchronous or induction motors. The main principle of these devices is frequency and voltage amplitude change by *PWM* modulation on the output. By this simple principle, we could keep a really good energy efficiency about 95 %. The article shows all basic structural parts of device, their parameters and the purpose of their use.

Keywords: three-phase inverter, transistor IGBT, high-speed induction motor, scalar control, pulse width modulation

1 ÚVOD

Princip střídače spočívá v přeměně napětí stejnosměrného na napětí střídavé jednofázové či třífázové s volitelnou amplitudou a frekvencí. Volba uvedených parametrů výstupního napětí je zprostředkována pomocí tzv. pulsní šířkové modulace *PWM* (Pulse Width Modulation). Jako zdroj stejnosměrného napětí je možné využít usměrněnou distribuční síť, akumulátor nebo fotovoltaický panel.

Střídače jako takové dnes nacházejí uplatnění zejména v oblasti elektrických pohonů, záložních zdrojů UPS a fotovoltaických elektráren. Za pomoci moderních polovodičových prvků je dnes možné realizovat velmi sofistikovaná zařízení o velkém výkonu a účinnosti, s plynulou regulací frekvence a amplitudy výstupního napětí. Právě v oblasti pohonů jsou střídače s oblibou užívány k řízení otáček a momentu u principiálně jednoduchých a levných asynchronních strojů. Moderní střídače velkých výkonů navíc umožňují obousměrný tok energie (rekuperaci), čímž je možné u daného systému docílit ještě vyšší energetické hospodárnosti.

2 POŽADAVKY NA ZAŘÍZENÍ

Tabulka 1: Parametry vysokootáčkového asynchronního motoru:

P_{mech} [kW]	n_{mot} [ot.min ⁻¹]	U_{UV} [V]	η_{mot} [-]	$\cos \varphi$ [-]
50	50 000	400	0,8	0,8

Tabulka 2: Parametry 3-fázového střídače s 6-pulsním diodovým usměrňovačem a LC filtrem:

P_{OUT} [kW]	U_{UV} [V]	$f_{1.h}$ [kHz]	f_{PWM} [kHz]
62,5	400	1	20

3 ZÁKLADNÍ ČÁSTI ZAŘÍZENÍ

3.1 VÝKONOVÉ MODULY STŘÍDAČE

Výpočet amplitudy napětí v meziobvodu:

$$U_m = \sqrt{2} \cdot U_{UV} = \sqrt{2} \cdot 400 = \underline{565 \text{ V}} \quad (3.1 - 1)$$

Výpočet střední hodnoty napětí v meziobvodu (6 - pulsní usměrňovač s LC filtrem):

$$U_d = 1,35 \cdot U_{UV} = 1,35 \cdot 400 = \underline{540 \text{ V}} \quad (3.1 - 2)$$

Výpočet zdánlivého výkonu 1. harmonické na výstupu střídače:

$$S_{OUT} = \frac{P_{OUT}}{\cos \varphi} = \frac{62\,500}{0,8} = \underline{78,1 \text{ kVA}} \quad (3.1 - 3)$$

Výpočet amplitudy 1. harmonické fázového proudu střídače:

$$I_{m,1.} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{S}{U_d} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{78\,100}{540} = \underline{167 \text{ A}} \quad (3.1 - 4)$$

Jelikož je střídač napájen z třífázové sítě, dosahuje amplituda napětí v meziobvodu až 565 V. Z bezpečnostních důvodů (překmitý v síti, parazitní indukčnosti obvodu) je tedy nutné použít moduly IGBT se závěrným napětím alespoň 1 200 V. Typový proud tranzistoru I_C volíme přibližně 2násobný vůči amplitudě 1. harmonické proudu, v našem případě 300 A. S ohledem na spínací frekvenci $f_{PWM} = 20 \text{ kHz}$ je také kladen důraz na rychlost použitých tranzistorů.

Z katalogu výrobce SEMIKRON byly vybrány bezpotenciálové polomůstky SKM400GB125D s integrovanými nulovými diodami. [1], [3]

Parametry polomůstku:

$U_{CE} = 1\,200 \text{ V}$; $I_C = 300 \text{ A}$; $I_F = 260 \text{ A}$; $U_{p,T} = 1,6 \text{ V}$; $U_{p,D0} = 0,7 \text{ V}$; $r_{CE} = 7,6 \text{ m}\Omega$; $r_F = 4,3 \text{ m}\Omega$; $t_{on} = 130 \text{ ns}$; $t_{off} = 630 \text{ ns}$; $E_{on} = 25 \text{ mJ}$; $E_{off} = 18 \text{ mJ}$; $Q_G = 2100 \text{ nC}$; $T_{jmax} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$; $R_{th(j-c),T} = 0,05 \text{ K/W}$; $R_{th(j-c),D0} = 0,125 \text{ K/W}$; $R_{th(c-h),m} = 0,038 \text{ K/W}$. [4]

Výpočet ztrát všech 6 tranzistorů v můstku způsobených vedením proudu:

$$P_{ved} = 6 \cdot (U_{p,T} \cdot I_{T,av} + r_{CE} \cdot I_{T,ef}^2) = 6 \cdot (1,6 \cdot 45,9 + 7,6 \cdot 10^{-3} \cdot 78,9^2) = \underline{726 \text{ W}} \quad (3.1 - 5)$$

Výpočet celkové tepelné energie tranzistoru uvolněné při přepínání (odečteno při $R_{Gon, off} = 4,1 \text{ }\Omega$):

$$E_c = E_{on} + E_{off} = 25 \cdot 10^{-3} + 18 \cdot 10^{-3} = \underline{43 \text{ mJ}} \quad (3.1 - 6)$$

Výpočet činitele proudového využití tranzistoru:

$$K_I = \frac{I_{m,1.}}{I_C^*} = \frac{167}{225} = \underline{0,742} \quad (3.1 - 7)$$

Poznámka:

- Neuvažujeme přímo typový proud tranzistoru I_C ale I_C^* (nižší hodnotu), abychom zachovali alespoň částečnou momentovou přetížitelnost zařízení.

Výpočet přepínacích ztrát všech 6 tranzistorů v můstku:

$$P_{sw} = 6 \cdot \frac{1}{\pi} \cdot f_{PWM} \cdot E_c \cdot K_I = 6 \cdot \frac{1}{\pi} \cdot 20\,000 \cdot 43 \cdot 10^{-3} \cdot 0,742 = \underline{1\,218 \text{ W}} \quad (3.1 - 8)$$

Výpočet celkových ztrát 3-fázového můstku:

$$P_{Z,m} = P_{ved} + P_{sw} = 726 + 1\,218 = \underline{1\,944 \text{ W}} \quad (3.1 - 9)$$

Výpočet celkového činného výkonu meziobvodu:

$$P_d = P_{OUT} + P_{Z,m} = 62\,500 + 1\,944 = \underline{64,5\text{ kW}} \quad (3.1 - 10)$$

Zdroj [2], [3]

3.2 NAPĚŤOVÝ MEZIOBVOD – LC FILTR

Výpočet střední hodnoty proudu meziobvodu:

$$I_d = \frac{P_d}{U_d} = \frac{64\,500}{540} = \underline{120\text{ A}} \quad (3.2 - 1)$$

Výpočet indukčnosti tlumivky (6 – pulsní usměrňovač, $\pm \Delta I = 0,2 I_d$):

$$L = 0,00904 \cdot \frac{U_m}{\Delta I \cdot 2\pi \cdot f} = 0,00904 \cdot \frac{565}{24 \cdot 2\pi \cdot 50} = \underline{0,7\text{ mH}} \quad (3.2 - 2)$$

Výpočet kritické hodnoty filtrační kapacity s ohledem na rezonanci (v případě výpadku 1 fáze):

$$C_{krit} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_{krit}^2 \cdot L} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 100^2 \cdot 0,7 \cdot 10^{-3}} = \underline{3,6\text{ mF}} \quad (3.2 - 3)$$

Při konstrukci střídačů je vždy nezbytné brát zřetel na tzv. *elektromagnetickou kompatibilitu*. Z tohoto důvodu je žádoucí zajistit příliš nedeformovaný tvar odebíraného proudu ze sítě s co nejmenším počtem vyšších harmonických složek. K eliminování impulsního charakteru proudu ze sítě, odebíraného značnou filtrační kapacitou $4,5\text{ mF}$, je tedy také nezbytnou součástí meziobvodu výkonová tlumivka $0,7\text{ mH}$. Tím je zajištěn účinník λ přibližně $0,95$. Za velký benefit tlumivky v meziobvodu lze považovat také velké snížení efektivního proudu filtračními kondenzátory na přibližně 70 A (levnější kondenzátory, menší tepelné namáhání pouzdra).

3.3 BUDIČE VÝKONOVÝCH TRANZISTORŮ

Při výběru vhodného komerčně vyráběného budiče vycházíme z několika základních parametrů: *velikosti střední hodnoty proudu a náboje do hradla IGBT, maximální hodnoty napětí kolektor-emitor buzeného tranzistoru, maximální spínací frekvence, ochrany proti podpětí, ochrany proti zkratu na tranzistorech apod.* S ohledem na námi požadované parametry byly vybrány budiče od firmy SEMIKRON, typ SKYPER 32R.

Parametry budiče:

$U_{CEsense} = 1\,700\text{ V}$; $I_{OUTpeak} = 15\text{ A}$; $I_{OUTav} = 50\text{ mA}$; $Q_{OUT/pulse} = 2\,500\text{ nC}$; $f_{max} = 50\text{ kHz}$;
 $U_{in(h/I)} = 15/0\text{ V}$; $U_{GE(on/off)} = 15/-7\text{ V}$; $R_{in} = 10\text{ k}\Omega$; $C_{ps} = 12\text{ pF}$; $dU/dt = 50\text{ kV}/\mu\text{s}$;
 $t_{DT} = 3\text{ }\mu\text{s}$; $U_S = 15\text{ V}$; $I_S = 80\text{--}450\text{ mA}$; $Q_{OUT/pulse(boosted)} = 6\,000\text{ nC}$; $T_{op} = -40\text{--}85\text{ }^\circ\text{C}$. [5]

4 ZÁVĚR

Cílem tohoto příspěvku je seznámení čtenáře se základní problematikou návrhu a konstrukce dílčích částí 3-fázového střídače. Hlavní pozornost byla věnována zejména volbě výkonových modulů IGBT a následnému určení jejich tepelných ztrát. Celková konstrukce střídače takového výkonu je však značně problematická a vyžaduje mnoho elektrotechnických znalostí a zkušeností s danou problematikou. Aktuálně již byly kompletně navrženy silové obvody střídače vč. desek plošných spojů, budiče tranzistorů, nabíjecí a proudové vyrovnávací obvody, ochrany při havarijních stavech, galvanicky oddělené obvody měření napětí a proudu apod. S ohledem na značný ztrátový výkon $2\,300\text{ W}$ (ztráty 3-fázovém můstku + ztráty na usměrňovači) bylo taktéž nutné navrhnout, naměřit a sestavit výkonné aktivní vzduchové chlazení.

Cílem tohoto projektu a zadané diplomové práce je však kompletní sestavení funkčního zařízení, čemuž se budu také dále věnovat.

REFERENCE

- [1] Patočka, M. *Výkonová elektronika – I.část*. Skriptum FEKT VUT Brno, 2010.
- [2] Patočka, M. *Vybrané stati z výkonové elektroniky – svazek II*. Skriptum FEKT VUT Brno, 2005
- [3] Patočka, M. *Matematický nástroj pro analýzu PWM signálů, jeho užití ve střídavých pohonech*. VUT Brno: VUTIUM, 2000,
- [4] SEMIKRON. *SKM 400GB125D*. [online]. 27.06.2007 [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <https://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-datasheet-skm400gb125d-22890626/>
- [5] SEMIKRON. *SKYPER 32 R*. [online]. 26.05.2009 [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/482336.pdf>